

Modelagem Aplicada à Energia Eólica

Henrique Cardoso Köpke de Vasconcellos Machado

Orientador: Prof. Dr. Fernando Ramos Martins / Coorientador: Dr. Francisco José Lopes de Lima

Uma das primeiras etapas de qualquer projeto para geração de energia elétrica requer o levantamento do potencial energético local disponível. O levantamento do potencial eólico de uma região necessita da aquisição de um longo período de dados para apresentar a confiabilidade requerida para avaliação da viabilidade do projeto. A escassez de dados públicos e o custo para obtenção de novos dados são barreiras para o crescimento da participação dessas fontes de energia na matriz brasileira. Com o intuito de promover o conhecimento e capacitação técnica nesse setor, a Universidade Federal de São Paulo vem realizando pesquisas sobre recursos eólicos, por meio de estudos de modelagem numérica de mesoescala aplicada ao regime de ventos. Os dados de velocidade e direção dos ventos horizontais foram coletados em estações automáticas meteorológicas previamente definidas na região litorânea e de planalto do estado de São Paulo. Dados estes obtidos através do banco de dados disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estudos estatísticos sobre o regime dos ventos foram realizados para determinar a velocidade média e distribuição da direção do vento. Para efeito de comparação com os dados das estações foram rodadas simulações através do modelo WRF-ARW, disponibilizado pela *University Corporation for Atmospheric Research* – UCAR, e foram extraídos os resultados para as mesmas coordenadas das estações estabelecidas. De modo geral, o estudo procurou compreender a aplicabilidade dos modelos utilizados para previsão dos ventos e sua validação mostrou discrepâncias encontradas entre dados produzidos pelo modelo e os dados observados nas estações, auxiliando, deste modo, na ampliação de uma base de conhecimento para futuros estudos sobre potencial eólico na região.

1. Introdução

Esta pesquisa tem por objetivo aprimorar a base de conhecimento sobre a utilização e validação de modelos de simulação numérica para a aplicação na previsão de disponibilidade e variabilidade temporal e espacial do regime de ventos no território do estado de São Paulo visando, deste modo, uma futura aplicação em estudos sobre o potencial eólico disponível. Para tal

objetivo foram empregados, tanto dados produzidos com uso da modelagem numérica dos processos dinâmicos de vento que acontecem na atmosfera, quanto dados de sensoriamento coletados em estações meteorológicas em operação na região de estudo.

O plano de trabalho contemplou inicialmente a descrição da instalação do modelo WRF-ARW, aquisição de dados de entrada GFS, o pré-processamento, a

execução do modelo e o pós-processamento dos dados através do ARWpost, além da extração dos dados com a utilização da ferramenta GRADS e outros aplicativos secundários.

Para o processamento dos dados obtidos das estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a análise comparativa dos resultados com os dados gerados pelo modelo foi utilizado o software cedido pela empresa VAYUWIND.

Como complementação para o entendimento da metodologia aplicada foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a modelagem atmosférica com uso do modelo escolhido e estudos sobre análises estatísticas para a geração eólica e compreensão dos resultados obtidos.

1.1 Histórico do Aproveitamento de Potencial Eólico

O vento pode ser descrito como o deslocamento de uma parcela de ar. A radiação recebida pelo Sol na superfície e atmosfera terrestre é absorvida e liberada continuamente e de forma desigual tanto espacialmente quanto temporalmente. De acordo com (Martins et al. 2008), essa diferença entre as diversas regiões traz como consequência uma diversidade de temperaturas e pressões atmosféricas, ocasionando então uma circulação das massas de ar. As parcelas mais aquecidas diminuem sua densidade e tendem a se elevar enquanto as parcelas de ar mais frias tendem a ocupar o espaço liberado, dessa forma cria-se os movimentos convectivos e advectivos que contribuem para a circulação do ar. A atmosfera sempre tende a estabelecer o equilíbrio estando, portanto, em contínua

movimentação. Conforme a diferença de pressão entre as zonas se intensificam maior a intensidade do deslocamento do ar entre elas e, portanto, maior a intensidade do vento. Fatores como a rotação da terra e o relevo local também alteram os aspectos dinâmicos das massas de ar em larga, média e baixa escala respectivamente.

Em grande escala a translação da Terra ao redor do Sol altera o ângulo de incidência da radiação na mesma, definindo assim também a sazonalidade no aquecimento do planeta e estabelece também a variabilidade sazonal do recurso eólico tanto no que se refere aos fenômenos de larga escala quanto de pequena escala. O fenômeno de brisas marítimas e terrestres criadas pelas diferenças de aquecimento e resfriamento das parcelas de ar sobre a Terra e o Oceano, é um movimento cíclico diário frequentemente observado na região da Baixada Santista por se tratar de uma região litorânea.

Ainda segundo (Martins et al. 2008), historicamente o homem já vem utilizando o vento como fonte de energia, não apenas para geração de energia elétrica, mas como fonte de energia mecânica. O uso da energia eólica tem origem no oriente e data incerta, porém relatos mostram que os povos babilônicos já a utilizavam como forma de bombear água para a irrigação convertendo a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Essa tecnologia com o tempo foi expandindo-se para a Europa onde começaram a utiliza-la nos moinhos de vento para o processamento de grãos e produção de farinha. Porém, apenas há cerca de 150 anos, a energia eólica vem sendo estudada para produção de eletricidade e mais atualmente vem sendo tratada como

uma forma alternativa e limpa de produção de energia elétrica em contrapartida às usinas térmicas e hidrelétricas. A limitação para essa aplicação vinha pelo custo da tecnologia, que nas algumas décadas foi reduzida com o desenvolvimento de novos materiais, como os compósitos, que baratearam a fabricação das estruturas e os avanços na engenharia que geraram novos designs que aumentaram sua eficiência e reduziram o custo da energia produzida.

A crescente demanda de energia é um dos temas mais abordados na atualidade. O desenvolvimento econômico-social e tecnológico de um país está atualmente alicerçado na oferta e produção de energia sendo assim um fator político estratégico. As formas de atender essa demanda bem como suas implicações socioambientais são diversas e devem ser estudadas cautelosamente. Para cada região específica, deve-se analisar o seu potencial energético e os possíveis efeitos para cada fonte de energia ou planta de geração a fim de validar a escolha da matriz energética.

Com enfoque na geração de energia eólica, o regime de ventos foi investigado neste estudo preliminar, comparando dados obtidos pela modelagem atmosférica com dados observados em estações meteorológicas, para posterior estimativa do potencial energético disponível na região do estado de São Paulo. Algumas das características que incentivaram este estudo foram a proximidade da região com grandes centros consumidores e a proximidade com a rede de distribuição de energia. Ambos fatores colaboram economicamente e funcionalmente para a implantação da matriz eólica na região.

1.2 Ventos em Superfície e Rede de Estações de Superfície para a Coleta de Dados

Martins et al. (2008) descreve que nos níveis atmosféricos mais baixos, próximos à superfície, as aproximações de vento geostrófico e de vento gradiente, não podem mais ser aplicadas, devido a influência do atrito da superfície provocado pelo relevo e presença de obstáculos que podem gerar turbulências no fluxo. A camada superficial é compreendida nos primeiros 50-100 metros da atmosfera, onde ocorrem os intercâmbios de momento, calor e umidade entre a superfície e o ar atmosférico.

Ainda segundo Martins et al. (2008), é comum a inexistência de disponibilidade de dados locais devido aos custos de instalação e manutenção dos equipamentos necessários. Deste modo, o potencial eólico de um dado local pode ser estimado a partir de dados coletados nas proximidades, em regiões com características climáticas e ambientais similares. Institutos de pesquisa e de ensino, além de outras organizações, tais como aeroportos, realizam medições de dados de ventos. Estas medições podem, em muitas vezes, serem utilizadas para levantamentos de recursos eólicos locais e para validação de estimativas de fornecidas por modelos numéricos de previsão de vento. Porém, mesmo que a coleta de dados esteja de acordo com os padrões estabelecidos pela *World Meteorological Organization* (WMO), deve-se ter o cuidado de observar que tais medições podem não ter como foco principal o setor energético. Os dados obtidos de tais estações devem ser submetidos à uma análise cuidadosa para se verificar sua aplicabilidade e aspectos de operação

dos anemômetros, tais como, falhas ocorridas, substituição e calibração dos equipamentos, alterações nas unidades de medidas, etc.

1.3 Base de Dados Climáticos

As bases de dados climáticos em escala global e regional são geradas em projetos de reanálise de dados meteorológicos. Tais bases de dados compreendem longos períodos de observações de dados de atmosféricos e podem ser utilizados para alimentar modelos numéricos de previsão de tempo. Os dados são coletados em estações sinóticas, boias oceânicas, radiossondas, satélites, embarcações, etc. Todas as coletas são submetidas a rigorosos controles de qualidade e os dados podem ser utilizados para estimativas em regiões onde a quantidade de coletas em superfície sejam escassas. A desvantagem destas bases de dados, no entanto, é que as mesmas estão disponíveis em resoluções espaciais muito baixas, uma vez que a grade apresenta dimensões grandes para que possa ser reduzida a demanda computacional dos modelos que rodam em escala global.

1.4 Modelagem Numérica para o Setor de Energia Eólica

A modelagem numérica aplicada à geração eólica para qualquer localidade pode ser realizada com o uso de dados climáticos globais ou regionais. Os modelos simulam os escoamentos de ventos em vários níveis verticais, representando com uma precisão os fenômenos de escala sinótica. Os modelos em mesoescala que são utilizados para a modelagem regional das condições meteorológicas em áreas limitadas podem abranger desde centenas de

quilômetros até continentes. Por motivos de limitação de recursos computacionais as variáveis são previstas para pontos representativos de uma área, chamados de pontos de grade. A maior dificuldade no nível de confiabilidade de seus resultados está na baixa resolução espacial dos dados obtidos com uso de modelos numéricos. Isto acarreta na ausência de dados refinados de rugosidade, obstáculos e detalhamentos dos relevos locais, podendo resultar em erros intrínsecos na estimativa de vento.

Para minimizar tais erros utilizam-se artifícios de refinamento, *downscalings*, que podem ser feitos por métodos físicos ou estatísticos. No refinamento estatístico as informações de previsão de pontos de grade vizinhos são utilizadas em equações empíricas ajustadas a localidade com base em métodos estatísticos avançados. Já no refinamento físico, o vento geostrófico fornecido pelos modelos numéricos é utilizado para alimentar um modelo dinâmico com maior resolução espacial levando em conta as relações físicas da camada limite para ajuste do perfil de vento, e as condições fisiográficas locais.

Em alguns casos pode-se configurar o modelo para trabalhar com o sistema de grades aninhadas, em que uma grade de maior resolução e área de abrangência menor trabalha dentro da área de uma grade de resolução menor com área de abrangência maior e alimenta os dados de entrada da grade aninhada.

2. Metodologia

A metodologia proposta para este estudo se baseia na compreensão e aplicação do sistema de modelagem

numérica aplicado ao regime de ventos, na definição das estações meteorológicas à serem analisadas, na aquisição e validação dos dados das estações para os períodos definidos, na extração dos dados de vento em superfície gerados pelo modelo, para cada estação e período correspondente, na comparação dos resultados obtidos entre os dados das estações e os dados do modelo e na geração de gráficos do tipo “rosa dos ventos” e histogramas com as curvas de Weibull aplicadas para análise estatística.

2.1 Local do Estudo

A localidade escolhida para realização deste estudo foi o estado de São Paulo. Segundo o Atlas Eólico do Estado de São Paulo (ano), o estado é caracterizado por um clima denominado como Tropical Brasil Central. A altitude elevada da Serra do Mar diminui a temperatura média, caracterizando as áreas de serra como mesotérmica branda e superúmida que associada às influências oceânicas e ao efeito orográfico, implicam nas regiões com maiores índices de precipitação do estado.

As grandes variações de altimetria no estado devem-se às distintas feições geomorfológicas, sendo que na planície litorânea a altitudes variam de 0 a 100 metros, enquanto que nas áreas de serras e cuestas encontram-se altitudes acima de 710 metros.

As estações escolhidas para a referida análise estão localizadas na planície litorânea e no Planalto, acima da Serra do Mar, compreendidas entre as latitudes 23°S e 25°S e longitude 45°W e 49°W. Deste modo foi possível cobrir uma faixa próxima a região costeira que possibilitasse uma análise comparativa

de ventos em dois relevos distintos, planície litorânea e planalto, Figura 1.

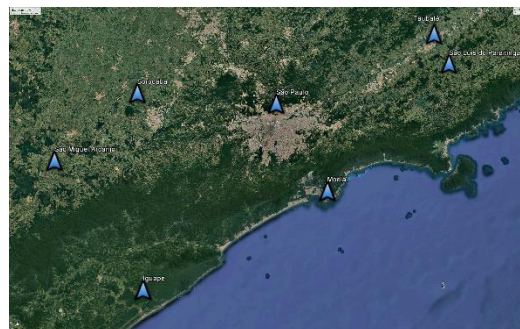


Figura 1 - Localização das Estações Automáticas Selecionadas INMET.

Foram selecionadas as estações pela dispersão na localização e disponibilidade de dados para o período de 2009, ano escolhido para análise, como mostra a Tabela 1.

Estações	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
São Luis do Paraitinga-A740	-23.228362	-45.417055	862
Taubaté-A728	-23.041668	-45.520841	582
Moela-A745	-24.047845	-46.26334	32
São Paulo-A701	-23.496294	-46.620088	786
Sorocaba-A713	-23.426035	-47.585552	609
Iguape-A712	-24.671654	-47.545896	3
São Miguel Arcanjo-A715	-23.852022	-48.164817	676

Tabela 1 - Tabela das estações selecionadas inicialmente.

2.2 Modelo WRF

O primeiro passo para a realização do estudo foi a instalação do modelo WRF, que geralmente é rodado em computadores dotados de grande potencial de processamento, porém neste caso, devido à pequena área de abrangência do estudo, foi possível a instalação do mesmo em um computador de uso pessoal.

Segundo Filho et al. (2008), o modelo numérico de mesoescala WRF, acrônimo de *Weather Research and Forecasting Model*, é considerado um modelo de previsão numérica da próxima geração, pois além de ser flexível com relação à sua instalação e

configuração física e numérica, o mesmo pode ser utilizado em diversas escalas, deste modo enquadrando no presente estudo como um modelo de mesoescala, com abrangência de centenas de quilômetros.

O Modelo WRF ainda permite realizar simulações com dados reais ou idealizados e é considerado muito eficiente em termos computacionais com uma arquitetura de software que permite o processamento paralelo ou serial. Ainda segundo Filho et al. (2008), este modelo é o resultado de um esforço conjunto de diversas entidades dos Estados Unidos: o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), a NOAA, o NCEP, o *Forecast Systems Laboratory* (FSL), a *Air Force Weather Agency* (AFWA), o *Naval Research Laboratory* (NRL), a Universidade de Oklahoma e a *Federal Aviation Administration* (FAA). Além destas instituições anteriormente citadas, existe, devido sua larga aplicabilidade e grande disseminação, uma vasta comunidade internacional de usuários com a criação de fóruns de discussão e apoio à usuários na web.

2.3 Hardware Utilizado

O Hardware utilizado possui a seguinte configuração:

- Processador Intel Xeon 1230v2 3.30 GHz 8MB SmartCache 64-bit com 4 núcleos e 8 threads
- Memória RAM de 16GB DDR3 1600MHz
- Motherboard Asus P8Z77-V LE
- Placa de Vídeo Nvidia QUADRO 600 1GB DDR3 dual vídeo
- 2 HDs de 1TB cada SATA de 6GB/s 3,5" 7200RPM

2.4 Softwares Utilizados

Os softwares utilizados para geração de dados e análise comparativa e geração de imagens e resultados foram:

- Sistema Operacional Linux UBUNTU 15.4 64-bit
- WRF 3.7.1
- WPS 3.7.1
- Pacote LibreOffice 5.0.6 x64
- TeamViewer 11.0.5 x64
- Sistema Operacional Microsoft Windows 10 64-bit
- Aplicativo VAYU-WIND 1.0
- Aplicativo QGIS 2.18
- Google Earth
- FileZilla

2.5 Instalação e Compilação do Modelo WRF

O sistema operacional escolhido para rodar o modelo foi o Ubuntu 15.10. Para a instalação foi baixado o arquivo de imagem (.ISO) no site <http://www.ubuntu.com>, e em sequência foi utilizado o arquivo de imagem em conjunto com o programa *Universal USB Installer* para a criação de um pendrive de instalação do SO e efetuada a instalação padrão do mesmo.

Antes da instalação do WRF, é necessário preparar o computador para a execução do modelo. Para isto, são instaladas as bibliotecas de dados do Linux, compiladores C/C++ e Fortran. Os pacotes iniciais foram:

- JasPer-1.900.1
- zlib-1.2.8
- libpng-1.2.34
- netcdf-4.4.0
- jpegsrc-v8
- NCL-NCARG
- Curl
- m4
- perl
- cpp
- flex
- csh

Após a instalação dos pacotes iniciais foi dado início a instalação do WRF e seus subsistemas. Os arquivos necessários para a instalação foram adquiridos no site da *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR). Os arquivos (.tar) do WRF-ARW e WPS baixados foram transferidos para o diretório designado e descompactados. Foi criado então automaticamente o diretório WRFV3. Dentro do diretório foram descompactados os arquivos para configuração da instalação e compilação dos arquivos executáveis. Foi executado então o arquivo “configure”. O *script* configure cria o arquivo de configuração para a compilação do WRF, tendo como principal função checar os recursos computacionais (*hardware e software*), oferecendo ao usuário opções de acordo com hardware utilizado. Neste caso foram selecionadas as opções “2. (smpar) PGI (pgf90/gcc)” e em seguida a opção (1) “basic”, Figura 2.

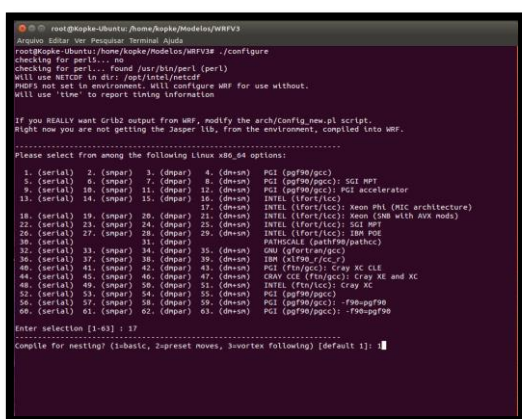


Figura 2 - Configuração para compilação do WRF.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em seguida foi criado o arquivo chamado “configure.wrf”, sendo que o mesmo pode ser editado com outras opções, caso seja necessário. Após a

configuração foi utilizado o *script* “compile” com a opção “em_real” e executado, adequado para o modelo que será rodado. Este comando cria os seguintes arquivos executáveis: ndown.exe, tc.exe, real.exe e wrf.exe. Caso todos estes arquivos tenham sido criados, a compilação do WRF obteve sucesso.

Em alguns tutoriais o arquivo “nup.exe” também é citado como criado nesta etapa durante a compilação, porém o tutorial oficial do WRF não cita a criação deste arquivo – Figura 3.

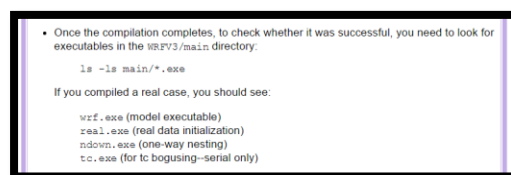


Figura 3 - Trecho adaptado do tutorial oficial para instalação do WRF. Fonte: (Anon [s.d.]

2.6 Compilação do WPS

De maneira análoga à compilação do WRF o arquivo de instalação foi descompactado e criado então o diretório “WPS”. Neste diretório encontramos também um *script* configure, porém antes da configuração foi necessário criar alguns *paths* para as bibliotecas *ungrib*.

Neste passo deve ser configurada a compilação do WPS de acordo com a configuração utilizada na compilação do WRF. Para isto foi selecionada a opção (17) “Linux x86_64, Intel compiler (serial)” conforme mostra a Figura 4.

Após esta configuração foi executado o comando para a compilação. Se a compilação é bem-sucedida, os seguintes arquivos são criados no diretório: geogrid.exe, ungrib.exe e metgrid.exe como mostra a Figura 5 do

tutorial da UCAR.

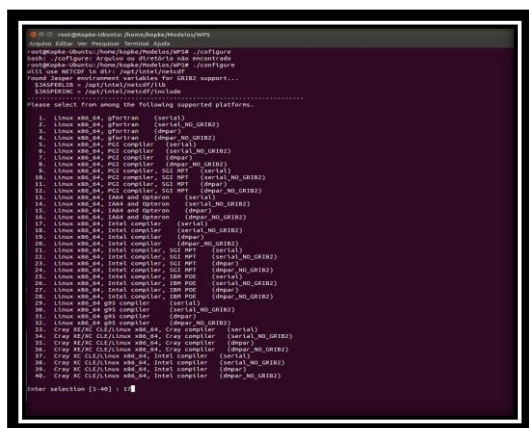


Figura 4 - Configuração para compilação do WPS.
Fonte: Elaborado pelo Autor

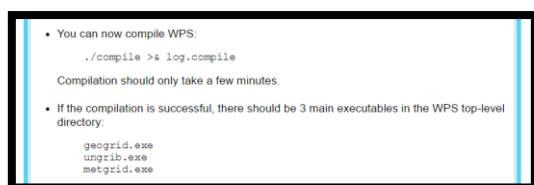


Figura 5 - Tutorial de compilação do WPS. Fonte: (Anon [s.d.])

2.7 Aquisição de Parâmetros Geofísicos para o WPS.

Para a realização dos testes foram adquiridos no site do WRF os dados geográficos e de terreno que contém as categorias de solo, categoria de uso da terra, altura do terreno, temperatura média anual do solo, fração de vegetação mensal, albedo mensal, albedo máximo de neve e declive. Categorias aplicadas as grades do modelo por padrão. Os conjuntos de dados globais para cada um desses campos são fornecidos através da página de download do WRF e, como esses dados são invariantes no tempo, eles só precisam ser baixados uma vez.

Vários conjuntos de dados estão disponíveis em apenas uma resolução, mas outros são disponibilizados em resoluções de 30", 2', 5' e 10'. O usuário não precisa baixar todas as resoluções disponíveis para um conjunto de dados, embora os campos interpolados sejam geralmente mais representativos se uma resolução de dados próxima à do domínio de simulação for usada, no caso deste estudo a resolução de 30".

2.8 Aquisição dos Arquivos de Entrada para o Modelo

Devido à resolução espacial definida para o trabalho, abrangendo uma área com ponto central nas coordenadas da estação Moela – A745 (-24.05°S e -46.26°O), e grade com resolução espacial horizontal de 5 km, com 100 células na direção Norte-Sul e 120 células na direção Leste-Oeste, foram escolhidos como dados de entrada para o modelo, os arquivos GFS-ANL 004, com resolução espacial de 0.5° e resolução temporal de 6 horas.

Os dados foram baixados do servidor:

ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/GFS/analysis_only/ com o auxílio do cliente FTP FileZilla. Foram cerca de 4 arquivos do tipo grib2 com tamanho aproximado de 45 Mb cada arquivo, totalizando aproximadamente para os quatro meses 22Gb de dados contendo informações a serem trabalhadas pelo modelo WRF.

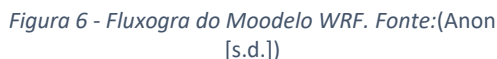
2.9 Pré-processamento WPS

Simplificadamente, o modelo WRF trabalha com quatro principais etapas como pode ser visto no fluxograma da Figura 6, O pré-processamento, o processamento pelo modelo, o pós-processamento e pôr fim

Ainda no pré-processamento e com o arquivo *namelist.wps* devidamente configurado o primeiro programa a ser executado será o *geogrid.exe*, responsável pela interpolação dos dados geográficos na grade. Segundo o (Anon [s.d.]), a finalidade do *geogrid* é definir os domínios de simulação e interpolar vários conjuntos de dados terrestres com a grade do modelo. Os domínios da simulação são definidos pelas informações especificadas no *namelist.wps*. Além de computar os fatores de escala de latitude e longitude do mapa em cada ponto da grade, o *geogrid* irá interpolar as categorias de solo, uso da terra, altura do terreno, temperatura média anual do solo, fração de vegetação mensal, albedo mensal, entre outras categorias. Esse conjunto de dados globais pode ser adquirido através da página de download do WRF e, como esses dados são invariantes no tempo, os mesmos só necessitam serem baixados uma vez.

Além de interpolar os campos terrestres padrão, o programa *geogrid* é bastante geral para ser capaz de interpolar campos mais contínuos e categóricos para os domínios de simulação. Os conjuntos de dados novos ou adicionais podem ser interpolados para o domínio de simulação através do uso do arquivo de tabela GEOGRID.TBL. O arquivo define cada um dos campos que serão produzidos pelo *geogrid*, descrevendo os métodos de interpolação a serem usados para um campo, bem como o local no sistema de arquivos onde o conjunto de dados para esse campo está localizado.

Em seguida deve-se definir o link entre a grade gerada e os dados de entrada, contorno e condições iniciais.



A primeira etapa é o pré-processamento, onde se especifica a grade a ser trabalhada e as resoluções espaciais e temporais que serão utilizadas. Além disso é nessa etapa que se especifica o período para o qual o modelo será executado.

Dentro da pasta WPS está localizado o arquivo namelist.wps. Neste arquivo foram inseridas as informações mencionadas para o pré-processamento, bem como é possível também especificar outros parâmetros, tais como grades aninhadas e outros intervalos de tempo e resoluções.



Para isso utiliza-se os *Vtable* para especificar quais variáveis serão utilizadas e o comando “./link_grib.csh ..data/2009*” referenciando então quais os dados de entrada que devem ser utilizados. Neste momento, os arquivos intermediários serão gerados e estarão prontos para rodar o executável *ungrib.exe*, ainda no WPS.

De acordo com o manual (Anon [s.d.]), o programa *ungrib* é responsável por ler os arquivos tipo GRIB que contém os dados de entrada que possibilitam inicializar o modelo WRF.

O terceiro passo a ser executado no pré-processamento dos dados é rodar o aplicativo *metgrid*. O *metgrid* é o programa que irá interpolar os arquivos intermediários meteorológicos como dados extraídos pelo *ungrib*. Essa interpolação do *metgrid* nos fornecerá os arquivos formatados para que o programa *real* do WRF possa ler. A Figura 9, exemplifica os passos para o pré-processamento dos dados.

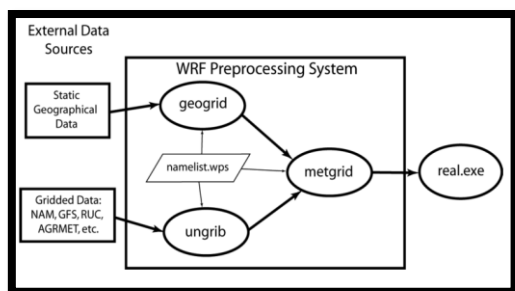


Figura 8 - Fluxograma do pré-processamento para o WRF. Fonte: (Anon [s.d.]).

2.10 Execução do modelo WRF-ARW

O modelo WRF pode rodar duas grandes classes de simulações ideal e real. No caso deste estudo foi escolhido o modo real, que necessariamente exige o pré-processamento dos dados pelo WPS. O arquivo executável *wrf.exe*,

sozinho não pode ler diretamente os arquivos gerados pelo *metgrid*. O primeiro passo é configurar o *namelist.input*, análogo ao *namelist.wps* é nele que serão configurados todos os parâmetros e variáveis que serão processados pelo programa WRF. Após a configuração do *namelist.input* deve ser rodado o programa real que preparará os arquivos de entrada direta para o WRF de acordo com as configurações estabelecidas.

O passo final do processamento então é rodar o modelo WRF, o qual irá analisar os arquivos de entrada e fará todos os cálculos conforme especificado com o auxílio de todos os dados até agora inseridos. A execução do *wrf.exe* é o passo que mais exige processamento do computador, portanto, para ser processado em um computador doméstico com a configuração descrita anteriormente, foi necessário estabelecer o *timestep* de 45. Nesta configuração, o modelo WRF levou cerca de 12 horas para o processamento relativo há um mês de dados.

O WRF criou como dados de saída os arquivos *wrfout** que foram então utilizados no pós-processamento para extração das variáveis brutas geradas e/ou geração de novas variáveis de acordo como programa de pós-processamento escolhido. A Figura 9 exemplifica o fluxo de processamento do WRF.

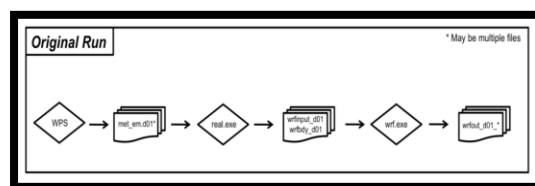


Figura 9 - Fluxograma do processamento pelo modelo WRF. Fonte: (Anon [s.d.])

2.11 Pós-processamento ARWpost

Após o processamento do modelo WRF, foram gerados arquivos no formato *wrfout**, que foram utilizados como arquivos de entrada para programas de pós-processamento ou visualização gráfica. Neste caso foi utilizado o ARWpost, que pós-processou os dados gerados e criou novos arquivos com os parâmetros definidos pelo *namelist.ARWpost* análogo aos *namelist* do WPS e WRF.

Por fim foram gerados dois arquivos do tipo *.dat* e *.ctl* que poderão ser interpretados pelos programas anteriormente citados e utilizados para este estudo, tais como o GRADS e o VAPOR.

2.12 GRADS

O programa GRADS foi utilizado para este estudo, pois o mesmo possibilita fazer a análise e extração dos dados de interesse que permitiram a exportação dos dados para o programa VAYUWIND, onde foram feitas as comparações entre os dados do modelo e os dados das estações.

Esse programa foi de suma importância para a realização deste estudo, pois o mesmo permite a interpretação e simulação das variáveis WS10 e WD10, respectivamente, velocidade do vento a 10 metros (*wind speed at 10m*) e direção do vento a 10m (*wind direction at 10m*). Essas duas variáveis são as variáveis de ventos em superfície, considerando a altura das estações meteorológicas utilizadas. No programa GRADS foi possível estabelecer as coordenadas para cada estação e extrair através de *scripts* os dados de ventos em um ponto fixo em

formato *.csv*, permitindo deste modo a importação dos dados para o programa VAYUWIND, e uma avaliação comparativa entre dados do WRF e das estações.

2.13 VAYUWIND

O VAYU é um programa para análise de dados de vento desenvolvido especificamente para estudos de potencial eólico aplicados à geração de energia eólica. O programa possui diversas ferramentas para filtragem de dados, validação, extrapolação, geração de gráficos, calibragem, entre outras. A licença do programa foi cedida para o uso neste estudo de caráter de pesquisa educacional pelo desenvolvedor.

A utilização do VAYU foi de suma importância pela facilidade na manipulação e visualização dos dados, tanto para os dados do modelo como para os dados das estações. Com ele foi possível a geração de todos os gráficos comparativos do tipo rosa dos ventos, gráficos sobrepostos aos mapas e histogramas apresentados.

Os dados de ambas variáveis, estações e modelo, foram importados pelo programa no formato *.csv*. De modo automático, o programa interpretou os dados para cada estação. Mesmo com os dados das estações terem sido geradas para cada mês independentemente foi possível, com a função *merge*, combiná-los em um único arquivo, possibilitando a visualização para todo o período de dados. Outra função importante foi sua aplicação na etapa de qualificação simples dos dados das estações em que era necessária a extração dos valores nulos de ventos para evitar que os mesmos interferissem na frequência de ocorrências de direções de ventos, tal como apresentado nos resultados.

A função de geração de histogramas, também foi de grande importância. Com essa função, foi possível, a criação automática dos histogramas com as variáveis escolhidas e a geração automática das curvas de distribuição de Weibull fornecendo os valores dos parâmetros de forma “k” e escala “c”.

2.14 Dados de Ventos das estações

Os dados de vento das estações automáticas utilizados foram cedidos pelo INMET, os mesmos foram adquiridos com uso anemômetros instalados, por padrão, a 10 metros do solo em estações automáticas. Deles foram extraídos, através da importação de arquivos .csv para planilhas, os meses intermediários de cada estação do ano: verão, outono, inverno e primavera. Deste modo foram construídas planilhas no programa com os dados de velocidade média e direção do vento para os meses de janeiro, abril, julho e outubro. A partir destes dados foram salvos arquivos de texto do tipo .csv, para que possibilitassem a importação dos mesmos para o software VAYU, onde foram geradas as informações para análise dos resultados comparativos entre os dados de vento produzidos pelo modelo e observados nas estações meteorológicas.

2.15 Curva de Weibull e Ajuste por Máxima Verossimilhança

A determinação da distribuição estatística da velocidade de vento é essencial para estimar o potencial do recurso eólico disponível na região. A Distribuição Cumulativa de Weibull é muito utilizada para descrever o regime

de ventos observados em estações de coleta de dados. Essa distribuição é descrita pela eq. (1) e possui 2 parâmetros: o fator de forma (k) e o fator de escala (c). O fator de escala apresenta unidades de velocidade do vento e o fator de forma é adimensional. A variável aleatória da distribuição é a velocidade do vento representada por v. Os parâmetros (c) e (k), conforme discutido em (Rizk 1987), podem ser determinados a partir da transformação da Eq. (2) na forma linear e representada pela reta Eq. (3) em que as variáveis (x), (y), (a) e (b) são providas pelas Eq. (4 e 5).

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

$$\ln(-\ln(1-f(v))) = -k \ln(c) + k \ln(v) \quad (2)$$

$$y = a + bx \quad (3)$$

$$y = \ln[-\ln(1-f(v))] \quad \text{e} \quad x = \ln(v) \quad (4)$$

$$a = -k \ln(c) \quad \text{e} \quad b = k \quad (5)$$

O software VAYUWIND permite a determinação dos dois parâmetros da distribuição de Weibull com três parametrizações distintas – WASP, máxima verossimilhança e mínimos quadrados.

Segundo Dantas (2008), os parâmetros em cada estudo realizado devem ser estimados a partir de observações amostrais. Entre os vários métodos de estimativa conhecidos um dos principais é o método de máxima verossimilhança (Max Likelihood). Este método de ajuste funciona adequando, dentre todas as amostras obtidas pelos possíveis valores de seus parâmetros, quais que possuem a maior possibilidade de ter gerado tal amostra.

3. Resultados

3.1 Interpretação e Análises dos Gráficos de Frequência de Ocorrências de Direções dos Ventos

Os dados gerados pelo modelo WRF e pelas estações meteorológicas automáticas foram importadas para o programa VAYUWIND, onde foi possível aplicar a metodologia descrita e unir ambos resultados em uma única plataforma, de forma a permitir uma análise estatística e visual para a seleção de dois exemplos extremos de melhor e pior desempenho do modelo WRF na simulação do regime de vento para a área de estudo – tanto para planície litorânea quanto para o planalto.

Para a seleção das estações que foram analisadas, foi gerado um gráfico do tipo rosa dos ventos para cada uma das sete estações iniciais, Figura 10. Estes gráficos representam as amostras conjuntas de dados de frequência de ocorrência de ventos por direção. Os dados utilizados são referentes aos quatro meses que foram estabelecidos inicialmente. Os dados de direção de ventos vêm inicialmente com variação de 360°. Para facilitar a visualização e obter uma quantidade maior de dados amostrais, as amostras foram agrupadas em intervalos de 45°, compreendendo então, uma distribuição entre oito direções básicas, Norte (337.5 – 22.5°), Nordeste (22.5 – 67.5°), Leste (67.5 – 112.5°), Sudeste (112.5 – 157.5°), Sul (157.5 – 202.5°), Sudoeste (202.5 – 247.5°), Oeste (247.5 – 295.5°) e Noroeste (295.5 – 337.5°).

Através destes gráficos podemos destacar alguns mais discrepantes entre os resultados dos modelos e estações. Podemos perceber que na região de

planície litorânea, a estação de Iguape-A712, foi a que obteve uma maior aproximação entre os resultados do modelo WRF e os dados observados na estação. Em contrapartida, a estação de Moela-A745 foi a que obteve a maior discrepância no litoral do estado.

Já para a região do planalto podemos observar que a estação em que os resultados do modelo mais se aproximaram dos dados observados na estação foi a estação de São Paulo-A701. A estação em que o comparativo menos se aproximou foi a estação de Taubaté-A728, podendo ser observado que não apenas obteve resultados mais díspares entre o modelo e os dados da estação, como houve uma maior persistência da direção dos ventos entre nordeste e sudeste e menor nas outras direções em comparação com os dados da estação

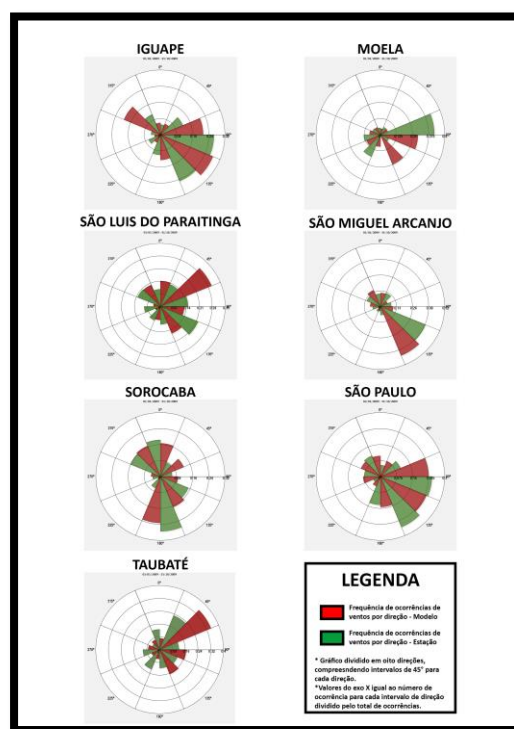


Figura 10 - Gráficos de rosa dos ventos (frequência de ocorrência por intervalo de direção).

As discussões a seguir estão focadas nestas quatro estações que apresentaram maior e menor concordância entre valores resultantes do modelo e valores observados.

3.2 Análise Comparativa entre os resultados do Modelo e observados nas Estações

Todas as estações escolhidas para esta análise comparativa estavam com os anemômetros localizados à 10 metros de altura do solo. Os dados de ventos extraídos do modelo foram de ventos em superfície, considerando 10 metros do solo também.

O gráfico projetado dos dados de vento observados na estação de Moela pode ser visualizado em verde na Figura 11 e os dados produzidos pelo modelo estão em vermelho na Figura 12.

Através de uma análise visual é possível observar que os dados medidos na estação não correspondem ao fornecidos pelo modelo. Neste caso, a estação de Moela está localizada bem no centro de uma ilha, como mostra a Figura 13, que para facilitar a visualização está com sobre-elevação, artifício que amplifica a altura das elevações na imagem para facilitar a visualização do relevo.

Através de uma análise visual é possível observar que os dados medidos na estação não correspondem ao esperado pelo modelo. Neste caso, a estação de Moela está localizada bem no centro de uma ilha, como mostra a Figura 13, que para facilitar a visualização está com sobre-elevação na imagem.



Figura 11 - Regime do vento na estação Moela-A745 - Dados da Estação. Imagem construída no programa VAYU.



Figura 12 - Regime de Ventos na estação Moela-A745 - dados do Modelo. Imagem construída no programa VAYU.

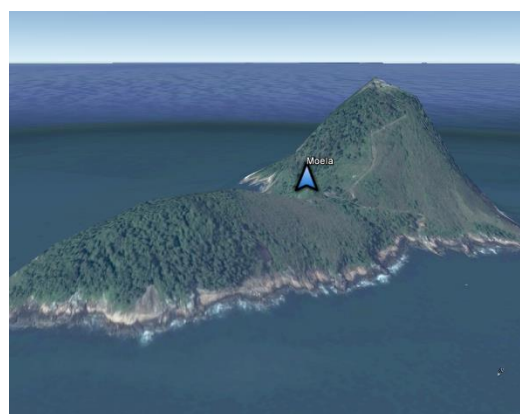


Figura 13 - Imagem do posicionamento da estação automática de Moela-A745 sobre o terreno, com sobre-elevação. Fonte: Google Earth.

As próximas imagens, a Figuras 14 e 15, ilustram de modo semelhante a estação automática de Iguape-A712, também localizada na planície litorânea do estado de São Paulo. Neste caso fica mais perceptível a semelhança entre os dados medidos pela estação e os dados esperados pelo modelo. A Figura 16, mostra a posição da estação de Iguape-A712 sobre o relevo, também com sobre-elevação.

Nesta imagem pode-se notar que a estação está posicionada no centro de um vale, porém a distância para o relevo mais acentuado é maior.



Figura 14 - Regime do vento na estação Iguape-A712 - Dados da Estação. Imagem construída no programa VAYU.



Figura 15 - Regime do vento na estação Iguape-A712 - Dados do Modelo. Imagem construída no programa VAYU.

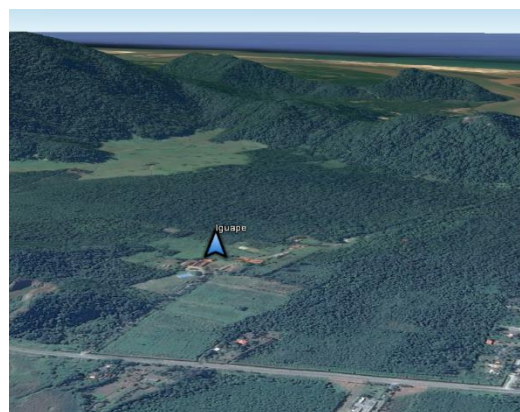


Figura 16 - Imagem do posicionamento da estação automática de Iguape-A712 sobre o terreno, com sobre-elevação. Fonte: Google Earth

As próximas estações são aquelas com maiores e menores distorções entre os resultados produzidos pelo modelo e os dados medidos nas estações na região do planalto.

A Figura 17, mostra os resultados medidos na estação automática de São Paulo-A701 e a Figura 18, mostra os resultados produzidos pelo modelo para o mesmo local. Ambas as imagens foram construídas sobrepondo o gráfico de rosa dos ventos sobre a localização da estação no mapa. No comparativo visual destas imagens é possível observar uma maior aproximação entre os dados medidos pela estação e os dados esperados do modelo. Na Figura 19, é possível verificar a área onde a estação está localizada e o relevo próximo da mesma.

A imagem nos mostra que a estação está localizada em uma região sem um relevo com grandes alternâncias no entorno, estando a mesma, inclusive, localizada em uma região de maior altitude local.



Figura 17 - Regime do vento na estação São Paulo-A701 - Dados da estação. Imagem construída no programa VAYU.



Figura 18 - Regime do vento na estação São Paulo-A701 - Dados do Modelo. Imagem construída no programa VAYU.

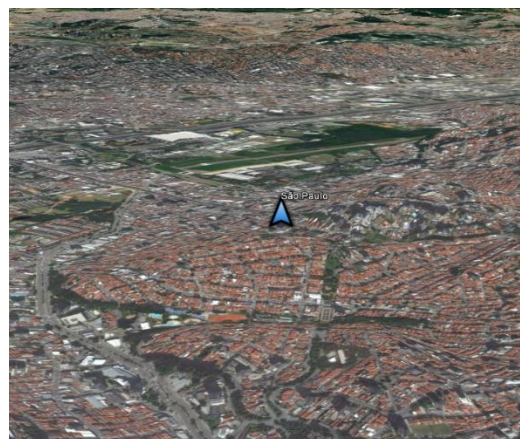


Figura 19 - Imagem do posicionamento da estação automática de São Paulo-A701 sobre o terreno, com sobre-elevação. Fonte: Google Earth

A última estação analisada foi a de Taubaté-A728. As Figuras 20 e 21 mostram respectivamente as imagens dos gráficos de rosa dos ventos sobrepostos na região onde a mesma está localizada, município de Taubaté-SP. A Figura 22 ilustra a posição da estação Taubaté-A728 sobreposta com a imagem exagerada do relevo.

A estação Taubaté-A728, está localizada no município homônimo e, mais precisamente na Base de Aviação de Taubaté. Pode-se observar que a mesma se encontra num vale com rugosidade do relevo próximo mediano, porém a mesma se localiza bem próxima às escarpas da Serra do Mar, com elevações, como se pode ver ao fundo da imagem, mais acentuadas. O desempenho dos dados medidos nesta estação, foram os que menos corresponderam ao fornecido pelo modelo.

3.3 Análise dos Histogramas e Parametrizações para as Distribuições de Weibull

A seguir podemos visualizar os histogramas gerados no VAYU onde estão apresentadas as frequências de velocidade de vento, bem como as curvas de Weibull geradas pelo programa compreendendo os parâmetros obtidos nas 3 metodologias de ajuste disponíveis no software.

As Figuras 23 a 26 mostram, em sequência, os histogramas gerados pelos dados de frequência de velocidade de ventos medidos nas estações, os dados fornecidos pelo modelo e, por fim, uma sobreposição de ambos os gráficos. As áreas em verde mostram os dados das estações, em vermelho os dados do modelo. As linhas em azul representam o ajuste da distribuição de Weibull obtida com a metodologia WASP, em amarelo com a metodologia dos mínimos quadrados e por fim em vermelho com a metodologia de máxima verossimilhança, sendo esta, a curva que melhor se adequou às distribuições em todos os casos.

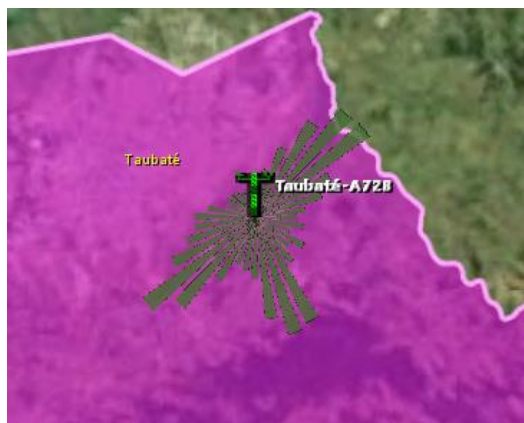


Figura 20 - Regime do vento na estação Taubaté-A728 - Dados da estação. Imagem construída no programa VAYU.

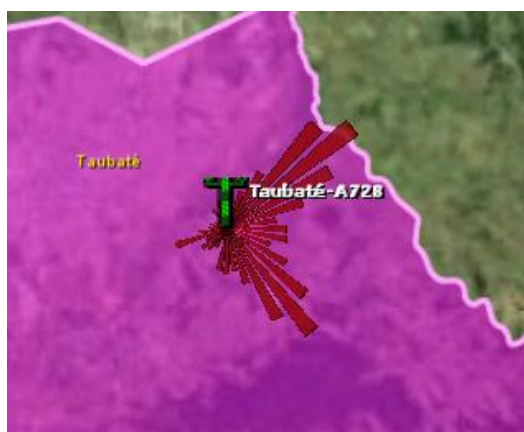


Figura 21 - Regime do vento na estação Taubaté-A728 - Dados do Modelo. Imagem construída no programa VAYU.

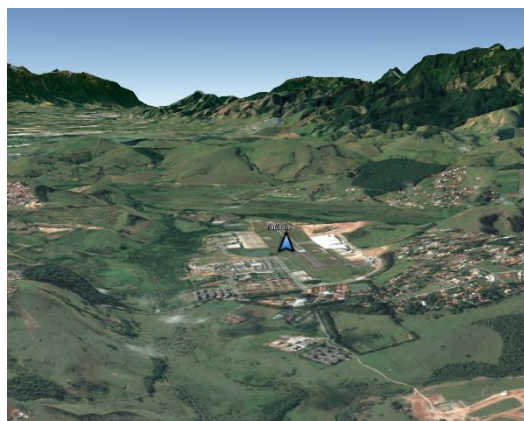


Figura 22 - Imagem do posicionamento da estação automática de Taubaté-A728 sobre o terreno, com sobrelevação. Fonte: Google Earth

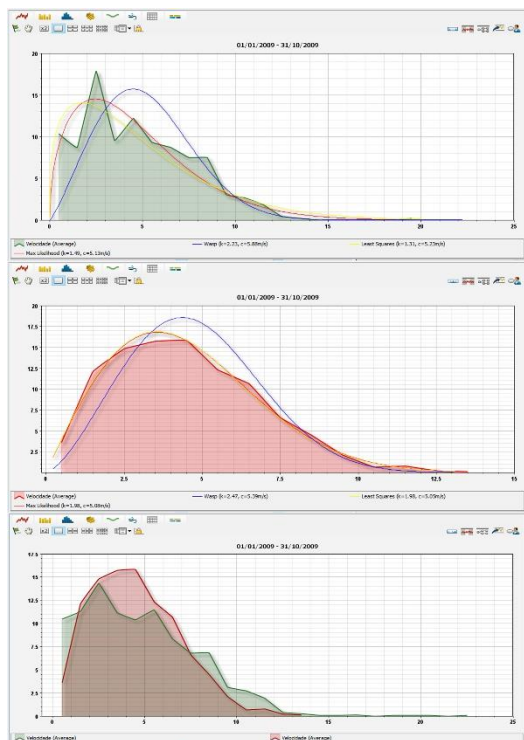


Figura 23 - Histogramas e curvas de Weibull para a estação automática de Moela-A745. Fonte: Imagem construída no VAYUWIND.

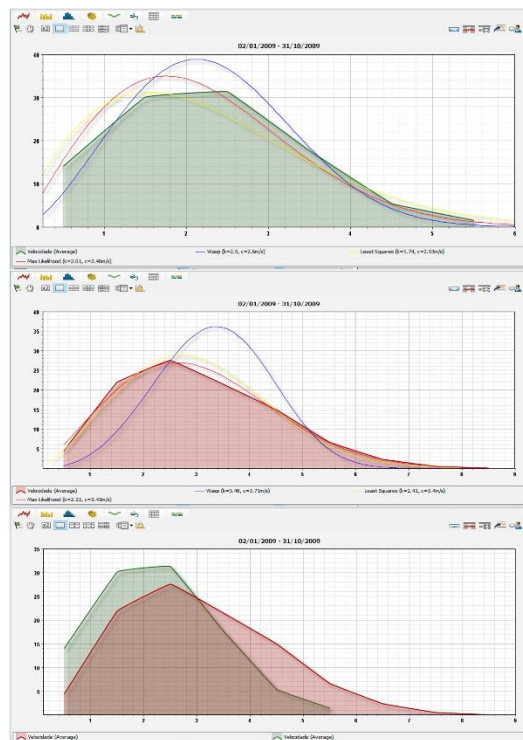


Figura 25 - Histogramas e curvas de Weibull para a estação automática de São Paulo-A701. Fonte: Imagem construída no VAYUWIND.

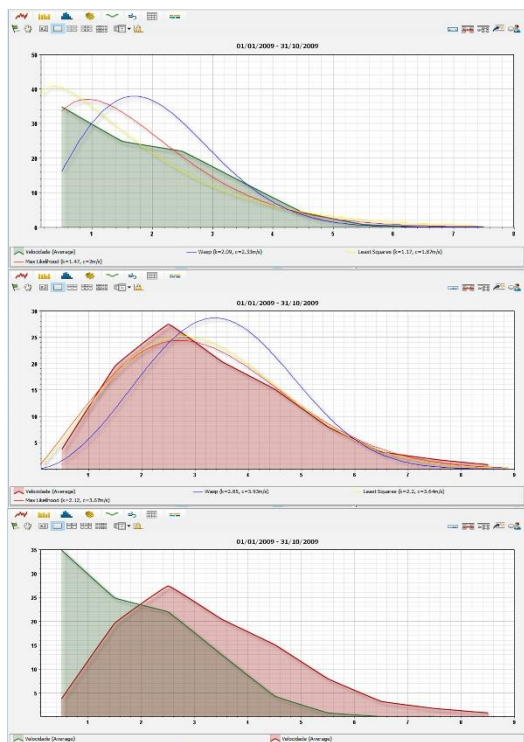


Figura 24 - Histogramas e curvas de Weibull para a estação automática de Iguape-A712. Fonte: Imagem construída no VAYUWIND.

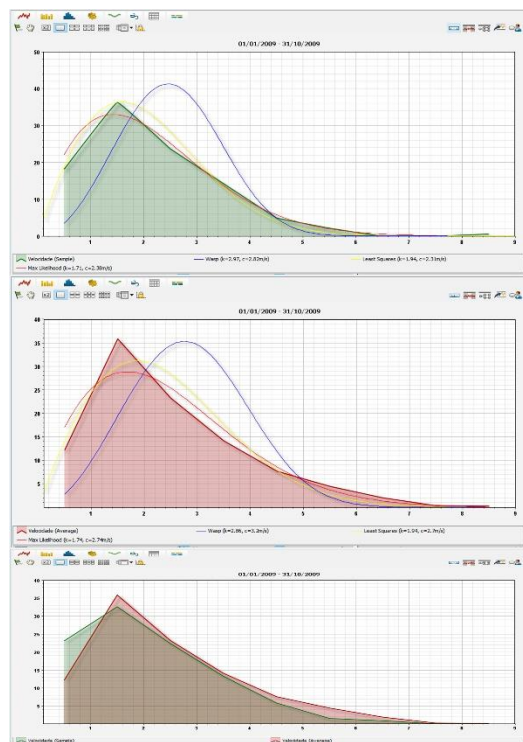


Figura 26 - Histogramas e curvas de Weibull para a estação automática de Taubaté-A728. Fonte: Imagem construída no VAYUWIND.

4. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal compreender o funcionamento de um modelo numérico de previsão do tempo desde de sua instalação e configuração, passando pelos processos de pré-processamento, processamento e pós-processamento e extração e análise comparativa dos resultados.

Tais resultados gerados pelo modelo possibilitaram investigar as correspondências entre os resultados do mesmo e dos dados de vento obtidos através das estações automáticas do INMET. Dentre todas as análises, foram priorizadas neste estudo duas principais estações para o planalto do estado de São Paulo, próximo à região litorânea com altitudes acima de 700m e duas para a planície litorânea próxima ao nível do mar.

Com estas amostras foi possível observar que em nem todos os casos houve similaridade entre o regime de vento produzido pelo modelo e os valores observados nas estações. Uma investigação futura deve ser realizada para compreender quais os parâmetros de configuração do modelo devem ser trabalhados para tornar possível uma simulação mais precisa do regime de ventos na área de estudo utilizando o modelo WRF.

Um estudo desse porte não tem a pretensão de ser conclusivo quanto aos resultados encontrados, devido ao curto período de dados utilizados e a resolução utilizada no modelo. Porém como trabalho acadêmico para o aprendizado sobre a aplicação de modelos numéricos para previsão atmosférica é totalmente válido, podendo inclusive sugerir alguns aprofundamentos nos casos encontrados

que sugerem a invalidade dos dados obtidos pelo modelo ou pelas estações.

Apesar das estações automáticas utilizadas como referência serem do Instituto Nacional de Meteorologia INMET, as mesmas não foram instaladas para serem aplicadas especificamente às medições de ventos para cálculo de potencial eólico nas regiões escolhida. Deste modo distorções já eram previstas.

Outro fator que pode ser ponderado neste estudo com base nos resultados, é pelas medições terem sido realizadas a poucos metros do solo, o que pode em combinação com a diversidade topográfica local provocar a turbulência nos fluxos de ventos e resultar em medições não tão fiéis como para alturas maiores nas quais geralmente são feitas as medições com o intuito de cálculo para potencial energético.

Por fim foram analisados os histogramas e as distribuições de Weibull. A grande importância da adequação das curvas de distribuição de Weibull, e conhecer a distribuição característica do vento local para a interpretação e estimativa do potencial eólico local. Neste estudo, a metodologia de ajuste da função de distribuição de Weibull aos histogramas de frequência de velocidades dos ventos que produziu o melhor ajuste numa avaliação visual foi o método de máxima verossimilhança.

5. Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Meteorologia INMET que disponibilizou os dados das estações automáticas para a realização deste trabalho, ao Dr. Francisco José Lopes de Lima que coorientou o trabalho realizado

com especial auxílio com o modelo WRF, ao Ricardo Zely da VAYUWIND que disponibilizou a licença do programa VAYU para realização das análises, e ao Prof. Dr. Fernando Ramos Martins que apoiou e orientou ao longo de toda a realização do projeto.

6. Referências

Anon, 2011. Atlas Eólico do Estado de São Paulo. , p.135.

Anon, Compiling WRF. Available at:
http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/compilation_tutorial.php#STEP4 [Acessado abril 10, 2016].

Dantas, M.A., 2008. Modelagem De Dados De Falhas De Equipamentos De Sub-Superfície Em Poços De Petróleo Da Bacia Potiguar. , p.118.

Filho, A.J.P. et al., 2008. Sistema De Previsão Hidrometeorológica Para a Bacia Do Alto Tietê. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia - SBMET*, 32(2-3), p.42-60. Available at:
http://www.sbmet.org.br/portal2013/publisher/uploads/publicacoes/4_2008__Volume_32_N_2_e_3.pdf#page=44.

Martins, F.R., Guarnieri, R. a. & Pereira, E.B., 2008. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), p.1304.1-1304.13.

Rizk, M., 1987. Wind characteristics and the available wind energy in egypt. *Solar and Wind Technology*, 4(4), p.491-499.